

## Экспериментальное моделирование сопротивления стягивания

В. Г. Затовский, Н. В. Минаков

Институт проблем материаловедения им. И. Н. Францевича  
НАН Украины, Киев

*Для исследования сопротивления стягивания модельных образцов из материалов на основе меди предлагается несложная модель контактной системы в виде плоской пластины с единичным контактными перешейком. Зависимость сопротивления стягивания от площади сечения контактного перешейка имеет вид степенно-показательной функции. Максимальное значение сопротивления стягивания достигает 30% общего контактного сопротивления модельного образца при площади контакта, составляющей 8–12% номинальной площади. В случае малых расстояний между токопроводящими контактными участками сопротивление стягивания на каждом контакте увеличивается.*

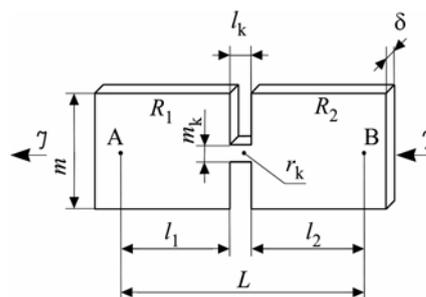
**Ключевые слова:** контакт, сопротивление стягивания, плоская модель, контактная площадка, токовые линии.

Изучению сопротивления стягивания как основной составляющей переходного сопротивления электрического контакта посвящено достаточно много публикаций еще с периода введения этого понятия Р. Хольмом и вывода им расчетных соотношений, систематизированных в работе [1]. Математическая интерпретация сопротивления стягивания в основном сводится к его зависимости от геометрических параметров пятен контактирования, которые обычно моделируются площадками соприкосновения в виде сферических или эллиптических сегментов [2–5]. Задача по определению сопротивления стягивания с учетом взаимного влияния контактных пятен теоретически решалась в работе [6]. Однако расчеты по известным методикам не обеспечивают результатов, по точности приближающихся к экспериментальным данным; требуется введение в расчетные формулы полуэмпирических корректирующих коэффициентов [7].

Исследование сопротивления стягивания реальных контактных систем неизбежно приводит к значительной погрешности и даже неопределенности из-за изменений на поверхности контактов и в рабочем слое, формирования вторичной структуры. Во многих случаях это влияние является преобладающим в процессах электропроводимости. Определение размеров токопроводящих участков в замкнутом состоянии контакта — трудная задача, которая решается специальными методами, например с нанесением в вакуумной камере радиоизотопного элемента на контактную поверхность с последующим созданием реального контакта [6]. Построение объемной модели контактного перехода для экспериментальных исследований “чистого” сопротивления стягивания, исключая влияние поверхностных эффектов (главным образом окислительных процессов), представляет значительную сложность и практически не реализовано.

© В. Г. Затовский, Н. В. Минаков, 2010

Рис. 1. Плоская модель контактной системы.



В настоящей работе предложена относительно доступная и, по нашему мнению, несложная для экспериментальных исследований сопротивляющая стягивания модель контактной

системы в виде плоской пластины. Принципиальная схема такой модели представлена на рис. 1. Принцип исследования сопротивления стягивания единичного контакта плоской токоподводящей модели в этом случае заключается в определении опытным путем величины электросопротивления данной контактной системы (между точками А и В) и сравнении этой величины с рассчитанными значениями электросопротивления.

В качестве объекта исследования использованы пластины из меди и медных сплавов (латуни Л62 и сплава Cu—3% (мас.) Fe), обладающих хорошей электропроводностью. Толщина модельных пластин  $\delta$  варьировалась от 0,09 до 1,2 мм, а ширина  $m$  составляла для всех модельных систем примерно 20 мм.

Металлическую пластину фиксировали в специальной оснастке из электроизоляционного материала щупами-электродами в точках А и В, расстояние между которыми  $L$ . Через модель контактной системы пропускался постоянный ток силой 3 А, источником которого был стабилизатор Б5-47. На участке пластины между точками А и В, расположенными на расстоянии не менее 10 мм от торцов, к которым подключались токоподводы, изначально измеряли электросопротивление цельной пластины (без вырезанных зазоров). Измерение проводили мостом постоянного тока Р3009, обеспечивающим класс точности 0,2 в диапазоне  $10^{-5}$ — $10^{-7}$  Ом, и определяли удельное сопротивление материала модели  $\rho$ .

Затем поэтапно в пластине с боковых ее сторон посередине между точками А и В вырезали зазоры. Таким образом в пластине формировали единичный контактный перешеек шириной  $m_k$  и с постоянной длиной  $l_k$ , (для различных пластин  $1 \leq l_k \leq 3$  мм). Зафиксировав его размеры и определив площадь сечения модельного контакта, измеряли электросопротивление  $R_k^*$ .

Очевидно, что

$$R_k = R_1 + R_2 + r_k, \quad (1)$$

где  $R_1$  и  $R_2$  — сопротивления участков пластины от точек измерения до кромок разреза;  $r_k$  — сопротивление перешейка-контакта.

Расчетное сопротивление плоской модели контактной системы при постоянном  $\rho$  составляет

$$R_k = \rho \left( \frac{l_1 + l_2}{m\delta} + \frac{l_k}{m_k\delta} \right) = \rho \left( \frac{L - l_k}{m\delta} + \frac{l_k}{m_k\delta} \right). \quad (2)$$

Сопротивление пластины с перешейком  $R_k^*$ , определенное посредством измерения (экспериментальное значение), отличается от

рассчитанной величины  $R_k - R_k^* > R_k$ . Очевидно, это обусловлено возникновением дополнительного сопротивления — сопротивления стягивания  $R_{ст}$ . При переходе тока через суженный контактный участок происходит нарушение однородности линий тока, их искривление.

$$R_{ст} = R_k^* - R_k. \quad (3)$$

Вклад сопротивления стягивания  $R_{ст}$  в общую величину контактного сопротивления  $R_k^*$  для конкретных условий модели без учета ее размеров и физических свойств материала можно оценить безразмерным параметром

$$\beta = R_{ст} / R_k^*. \quad (4)$$

Количественная оценка контактного перешейка может быть выражена отношением площади его сечения  $S_k$  к площади сечения цельной пластины  $S_0$

$$\alpha = S_k / S_0. \quad (5)$$

Эта величина в модели представляется как доля фактической площади контактирования в номинальной площади реального контакта.

Из очевидных представлений об электрическом контакте следуют граничные условия, присущие контактной модели:

при  $S_k \rightarrow 0$  ( $\alpha \rightarrow 0$ )  $R_k^* \rightarrow \infty$  и  $\beta \rightarrow 0$ , что соответствует разрыву электрического контакта;

при  $S_k = S_0$  ( $\alpha = 1$ )  $R_{ст} = 0$  и  $\beta = 0$ , то есть это условие проводимости цельной пластины.

Выполнение этих условий отображено на графических зависимостях  $\beta = f(\alpha)$ , полученных по результатам измерений электросопротивления модельных пластин с перешейками из указанных материалов (пластины из меди и медных сплавов латуни Л62 и сплава Cu—3% (мас.) Fe) (рис. 2).

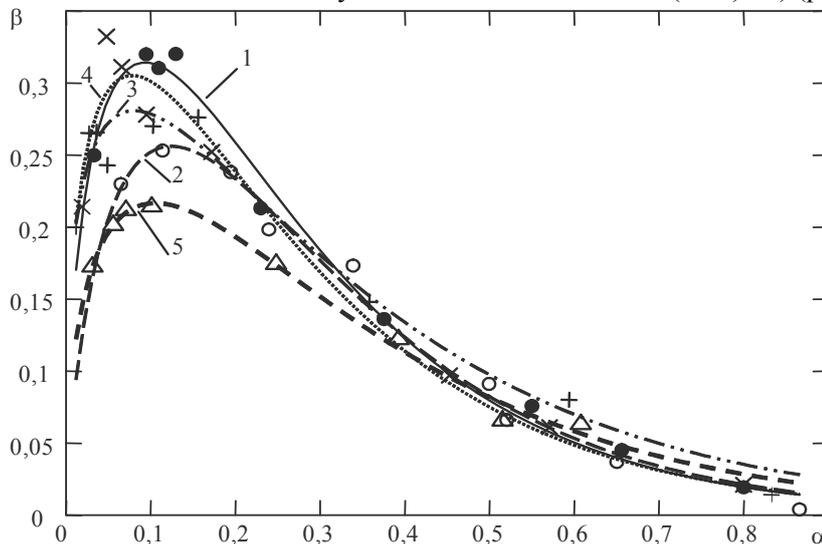


Рис. 2. Зависимость  $\beta = f(\alpha)$  для плоских пластин с перешейком: 1 — медь М0,  $\delta = 0,09$  мм; 2 — медь М0,  $\delta = 0,19$  мм; 3 — медь М1,  $\delta = 0,47$  мм; 4 — латунь Л62,  $\delta = 0,91$  мм; 5 — сплав Cu—3% (мас.) Fe,  $\delta = 1,2$  мм.

Графическая зависимость параметра сопротивления стягивания  $\beta$  от параметра  $\alpha$ , характеризующего фактическую площадь контактирования, является идентичной для всех испытанных материалов и представляет собой сложную степенно-показательную функцию. В общем случае, согласно работе [8],

$$\beta = a\alpha^b e^{c\alpha} \quad (6)$$

при  $a > 0, 0 < b < 1, c < 0$ .

Характерными точками этой функциональной зависимости являются: экстремум (максимум) в интервале  $0,12 \leq \alpha \leq 0,08$ , точка перегиба при  $\alpha \approx 0,25$ , а также экстраполированные точки граничных условий, соответствующие  $\alpha = 0$  и  $\alpha = 1$ .

В табл. 1 приведены значения коэффициентов функциональной зависимости (6) для исследованных модельных образцов, определенные методом наименьших квадратов.

В интервале значений  $\alpha$ , соответствующих  $S_k \geq 0,25 S_0$ , кривые зависимости  $\beta = f(\alpha)$  практически не обнаруживают существенного различия для исследованных контактных моделей. Этот факт дает основание сделать вывод, что в реальном случае контактирования пластичных материалов при больших нагрузках и, возможно, для жидкометаллических контактов сопротивление стягивания не зависит от размера контактных пятен, поскольку не обнаруживается влияния толщины модельной пластины на величину  $\beta$ . В этом случае сопротивление стягивания явно не зависит и от электропроводящих свойств контактных материалов. Так, правая часть функциональной зависимости  $\beta = f(\alpha)$  практически одна и та же для медных и латунных образцов, хотя электропроводность этих материалов существенно различается (табл. 1).

Согласно работе [9], в области  $1 \geq \alpha \geq 0,25$ , то есть при  $S_k \geq 0,25 S_0$ , зависимость  $\beta = f(\alpha)$  удовлетворительно отвечает уравнению  $\sqrt{\alpha} + \sqrt{\beta} = 1$ , что дает

$$R_{ст} = \left(1 - \sqrt{\frac{S_k}{S_0}}\right)^2 \cdot R_k^* \quad (7)$$

Левая часть зависимости  $\beta = f(\alpha)$  при  $\alpha \leq 0,25$  присуща реальным контактным системам. По данным работы [10], площадь фактических пятен контакта при соприкосновении даже гладкошлифованных плиток занимает до 30% номинальной площади. В этом интервале  $\alpha$  для всех

**Т а б л и ц а 1. Значения коэффициентов функции  $\beta = f(\alpha)$**

Материал пластины	$\delta$ , мм	$\rho$ , Ом·мм <sup>2</sup> /м	$a$	$b$	$c$
Mo	0,09	0,0184	0,91	0,26	-4,42
Mo	0,19	0,0182	2,25	0,69	-5,60
M1	0,47	0,0193	0,84	0,31	-3,88
Л62	0,91	0,0715	1,24	0,39	-5,06
Cu—3% (мас.) Fe	1,20	0,0350	1,44	0,57	-5,02

исследуемых контактных моделей характерен максимум зависимости  $\beta = f(\alpha)$ , соответствующий  $\alpha = 0,08—0,12$ . Наличие максимума можно объяснить, во-первых, значительным возрастанием контактного сопротивления при утонении контактного перешейка относительно общего электросопротивления на постоянном участке измерения и, во-вторых, тем, что при этих условиях линии тока приобретают практически установившиеся траектории. Образуются участки материала, не задействованные в электрической проводимости, своего рода балластные объемы. По-видимому, периферийные токовые линии у входа в узкий перешеек и у выхода из него искривляются по дугам, близким к окружности диаметром, который равен в данном случае ширине модельной пластины. Резкий спад кривой  $\beta = f(\alpha)$  при  $\alpha \rightarrow 0$  обусловлен увеличением плотности тока в контактом перешейке, которое на участке, соответствующем максимуму параметра  $\beta$ , достигает 15 А/мм<sup>2</sup> для тонкой медной фольги и 2,5—3 А/мм<sup>2</sup> для пластины сплава Cu—3% (мас.) Fe. Вследствие этого происходит возрастание  $R_k^*$  за счет выделения тепла в контактом перешейке. При этом более интенсивно уменьшается  $\beta$  для тонких модельных пластин с перешейками.

Из графической зависимости  $\beta = f(\alpha)$  (рис. 2) следует, что максимальное сопротивление стягивания для медной фольги ( $\delta = 0,09$  мм) составляет более 30% величины общего контактного сопротивления; для пластины толщиной 1,2 мм (Cu—3% (мас.) Fe) максимум сопротивления стягивания достигает ~22% величины  $R_k^*$ . Промежуточные значения максимальной величины  $\beta$  соответствуют модельным образцам, имеющим толщину между указанными величинами. По-видимому, на расположение и величину максимума параметра  $\beta$  влияют также электропроводящие свойства материала.

Исследовано влияние длины перешейка  $l_k$  на сопротивление стягивания  $R_{ст}$  для модельных контактных пластин толщиной 0,09 и 1,2 мм (табл. 2). Сопротивление стягивания практически не зависит от длины перешейка, что подтверждает правомерность выбранной модели для аналитического исследования “чистого” сопротивления стягивания.

С целью выяснения зависимости сопротивления стягивания от количества контактных перемычек в плоской модели на медной фольге

**Т а б л и ц а 2. Влияние длины контактного перешейка на сопротивление стягивания**

Контактный материал	Сопротивление стягивания $R_{ст}$ (мкОм) при $l_k$ (мм)								
	3,7	4,5	7,0	9,5	12,2	2,1	3,4	6,8	12,0
Медная фольга, $\delta = 0,09$ мм, $m_k = 4,5$ мм	130	134	131	134	135				
Пластина Cu—Fe, $\delta = 1,2$ мм, $m_k = 2,4$ мм						31,2	30,8	30,0	31,0

$\delta = 0,09$  мм выштампована однорядная перфорация в виде прямоугольных отверстий размером 2x3 мм, расстояние между которыми 2 мм, то есть ширина перемычек равна ширине отверстий. При пяти отверстиях получено  $\alpha = 0,55$  и  $\beta = 0,17$ , то есть в этом случае  $\beta$  примерно вдвое превышает соответствующее значение для единичного контактного перешейка, что свидетельствует о взаимовлиянии процесса электропроводимости через соседние контактные площадки. В случае малых расстояний между токопроводящими контактными участками электрический потенциал каждой площадки повышается под действием токов, протекающих по близлежащим контактными площадкам.

1. Хольм Р. Электрические контакты. — М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1961. — 464 с.
2. Савченко В. С. Уравнение сопротивления стягивания // Электрические контакты. — М.: Наука, 1973. — С. 160—162.
3. Займовский А. С., Усов В. В. Металлы и сплавы в электротехнике. — М.: Госэнергоиздат, 1949. — 682 с.
4. Савченко В. С. Уравнение переходного сопротивления контактов // Электрические контакты. — М.: Энергия, 1967. — С. 135—147.
5. Демкин Н. Б., Коротков М. А., Бойченко В. И., Дзекцер Н. Н. Площади касания и уравнение переходного сопротивления // Электричество. — 1971. — № 8. — С. 77—79.
6. Долинский Ю. М., Зиновьев В. В., Кораблев В. М. и др. Расчет сопротивления стягивания многоточечного контакта // Изв. вузов. Электромеханика. — 1978. — № 1. — С. 97—100.
7. Копытин Ф. А. К вопросу о переходных сопротивлениях электрических контактов // Математические и теоретические проблемы в контактной технике. — Алма-Ата: ИММ АН Каз.ССР, 1969. — С. 102—110.
8. Бронштейн И. Н., Семендяев К. А. Справочник по математике. — М.: Изд-во ФИЛ, 1959. — 608 с.

9. Вирченко Н. А., Ляшко И. И., Швецов К. И. Графики функций: (Справ.). — К.: Наук. думка, 1981. — 320 с.
10. Крагельский И. В., Добычин М. Н., Комболов В. С. Основы расчетов на трение и износ. — М.: Машиностроение, 1977. — 526 с.

### **Експериментальне моделювання опору стягнення**

В. Г. Затовський, М. В. Мінаков

*Для дослідження опору стягування модельних зразків з матеріалів на основі міді запропоновано нескладну модель контактної системи у вигляді плоскої пластини з одиничним контактним перешийком. Залежність опору стягування від площі перетину контактної перешийка має вигляд степеневопоказникової функції. Максимальне значення опору стягування досягає 30% загального контактної опору модельного зразка при площі контакту, що складає 8—12% номінальної площі. У випадку малих відстаней між струмопровідними контактними ділянками опір стягування на кожному контакті збільшується.*

**Ключові слова:** контакт, опір стягнення, плоска модель, контактна площа, лінії струму.

### **Experimental simulation of the resistance of the tightening**

V. Zatovskiy, N. Minakov

*For investigating the resistance of the tightening of model samples made from materials on the basis of copper it is proposed the simple model of the contact system in the form of flat plate with the single contact neck. The dependence of the resistance of tightening on the sectional area of contact neck takes the form of exponential function. The maximum the value of the resistance of tightening attains 30% of common contact resistance of model sample, with the contact area constituting 8—12% of nominal area. In the case of the small distances between the current-conducting contact sections the resistance of tightening on each contact increases.*

**Keywords:** contact, the resistance of tightening, flat model, contact area, current lines.